



Artículo / Article

## Información hidrológica, primer paso para diseñar una política local de pago por servicios ambientales

## Hydrological information, the first step to design a local policy of payment for ecosystem services

Jorge Luis Chagoya Fuentes<sup>1</sup>, Carlos Mallén Rivera<sup>2</sup>, Morag Anne McDonald<sup>3</sup>,  
Francisco Jiménez Otarola<sup>4</sup>, Muhammad Akbar Ibrahim<sup>4</sup>, Lourdes Velázquez Fragoso<sup>5</sup> y  
Francisco Becerra Luna<sup>6</sup>

### Resumen

Los recursos hidrológicos tienen significativa importancia en países con problemas de escasez de agua, parte de los cuales se atribuyen a la inexistencia de una relación entre los proveedores de servicios ambientales y de los usuarios. Los esquemas de pago por servicios ambientales hidrológicos (PSAH) surgen como una estrategia para conectarlos. El desarrollo de este esquema debería garantizar que los usos de la tierra de protección generen el servicio que se va a vender correctamente. Este estudio determinó el comportamiento hidrológico de los usos del suelo ubicados en un área de recarga de la Sierra de Otontepec, que correspondieron a: regeneración de bosques secundarios (SRF), pastizales estrella africana (GWT), pasto estrella africana y terrenos con arbustos (GS); bosque perturbado de *Quercus oleoides* (QF) y pastizales naturales (NG). Los indicadores fueron: precipitación, escorrentía, cambios de humedad del suelo, evapotranspiración y percolación. Los saldos hidrológicos mostraron que la percolación fue mayor en GWT (1 608 mm), GS (1 744 mm) y NG (1 314 mm), que en SRF (1 119 mm) y QF (974 mm). Los resultados indican que la recarga de agua subterránea durante el período de estudio proporcionó servicios ambientales hidrológicos convenientes, aun cuando la demanda del suministro de agua corriente en las tierras bajas está en un nivel máximo. Lo anterior implica que el uso del agua debe ser regulado y distribuido de manera más eficiente, en lugar de basarse en el aumento de la disponibilidad.

**Palabras clave:** Balance hídrico, escorrentía, evapotranspiración, infiltración, percolación, servicios ambientales.

### Abstract

Water resources have significant importance in countries with water scarcity. Part of this problem is attributed to the lack of relatedness between ecosystems service suppliers and users, and schemes of payment for hydrological ecosystem services (PHES) are emerging as a strategy to connect them. However, in the development of a scheme of PHES, one critical point is to find out if the protective land uses are adequately generating the service to sell. The aim of this study was to determine the hydrologic behaviour of land uses located in a hydrological recharge area of *Sierra de Otontepec*. The land uses were secondary regeneration forest (SRF), African star grasslands (GWT), African star grasslands with shrubs (GS), disturbed *Quercus oleoides* forest (QF) and natural grasslands (NG). Indicators were precipitation, throughfall, runoff, soil moisture changes, evapotranspiration and percolation. Hydrological balances showed that percolation was higher in GWT (1 608 mm), GS (1 744 mm) and NG (1 314 mm), than in SRF (1 119 mm) and QF (974 mm). Results indicate that groundwater recharge during the study period generated adequate water shed services; however, the demand for piped water supply in the lowlands is at a maximum. This implies that the use of water should be regulated, more efficiently distributed, rather than relying on the increased availability.

**Key words:** Water balance, runoff, evapotranspiration, infiltration, percolation, environmental services.

Fecha de recepción/date of receipt: 12 de septiembre de 2012; Fecha de aceptación/date of acceptance: 10 de enero de 2015.

<sup>1</sup> Fundación Pedro y Elena Hernández, A. C.

<sup>2</sup> Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales. INIFAP. Correo-e: mallen.carlos@inifap.gob.mx

<sup>3</sup> Bangor University.

<sup>4</sup> Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).

<sup>5</sup> Coordinación de Investigación, Innovación y Vinculación. INIFAP.

<sup>6</sup> Sitio Experimental Pachuca. CIR-Centro. INIFAP.

## Introducción

Los seres vivos dependen del agua para vivir y tener buena salud. Sin embargo, la Organización Mundial de la Salud (OMS) informa que alrededor de 80 por ciento de la población mundial vive en lugares donde el único líquido disponible es inseguro para el consumo (OMS, 2011). Los problemas relacionados con el agua, tales como el uso excesivo, la escasez, la contaminación, las inundaciones y las sequías son un desafío cada vez más importante para el desarrollo sostenible, como lo reconoció la Organización de Naciones Unidas al declarar al periodo de 2005-2015 como "La década del agua para la vida" (FAO, 2007).

Además, las poblaciones en crecimiento, el cambio climático global, la erosión del suelo, y las expectativas sociales son factores que han reducido la disponibilidad de agua potable fresca y limpia. Más de mil millones de personas en todo el mundo no tienen agua en cantidades suficientes para satisfacer los niveles mínimos de bienestar (Rosegrant *et al.*, 2002; World Bank, 2004).

En México, el suministro de este servicio ha generado problemas importantes debido al aumento en la demanda, determinada por el crecimiento de la población (25.8 millones de habitantes en 1950 a 103.4 millones en 2005), y el ingreso *per capita* (1.9% anual) (Meadows *et al.*, 2004; CNA, 2008). Los conflictos políticos entre los estados de Tamaulipas y Nuevo León, Guanajuato y Jalisco originados por la distribución limítrofe de agua de ríos ponen en evidencia lo anterior.

La Comisión Nacional del Agua (CNA) predice que, a partir del crecimiento de la población actual (1.02 % para el periodo 2000-2005) y la gestión del agua, la escasez será más crítica en los próximos años (CNA, 2010).

El estado de Veracruz, que se localiza en la vertiente del Golfo de México, se divide en tres regiones: norte, centro y sur. La región del norte tiene una precipitación media de 1 552 mm anuales y su tasa de evaporación superior a 70 % genera una presión media sobre la disponibilidad de agua de 10 a 20 %, la cual es un indicador que incluye la cantidad de agua disponible y utilizada, las condiciones climáticas y el tamaño de la población (4.94 millones de habitantes), de acuerdo a la clasificación de la FAO para el efecto (Fundación Gonzalo Río Arronte y Fundación Javier Barros Sierra, 2004; CNA, 2008).

Enfrentar la escasez de agua no es una tarea fácil debido a que el problema se origina no solo por la falta de protección de los servicios hidrológicos ecosistémicos, sino también por la extracción del agua, su transporte, almacenamiento, uso y contaminación (World Bank, 2004; CNA, 2006; UNESCO, 2006).

En este contexto, el programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) (FAO, 2004b) es una acción

## Introduction

Living beings depend on water for life and health. However, the World Health Organization (WHO) reports that about 80 percent of the people of the world live where the only available water is unsafe (OMS, 2011). Water-related problems such as overuse, scarcity, pollution, floods and drought are an increasingly important challenge to sustainable development, as the United Nations recognized in declaring 2005-2015 the "Water for Life" Decade (FAO, 2007).

In addition, growing populations, global climatic change, soil erosion, and social expectations are factors that have reduced the availability of fresh and clean drinking water. More than one billion people across the globe do not have available safe water in sufficient quantities to meet the minimum levels of health and income (Rosegrant *et al.*, 2002; World Bank, 2004).

Safe drinking water supply is a serious problem in Mexico because of the increasing demand of its growing population (25.8 million in 1950 to 103.4 million in 2005), and *per capita* income (1.9 % per year) (Meadows *et al.*, 2004; CNA, 2008). Political conflicts between Tamaulipas and Nuevo León, and Guanajuato and Jalisco States, originated by the boundary distribution of river water are a clear example of the aforementioned situation.

The *Comisión Nacional del Agua* (CNA) (the National Water Commission) predicts that due to the current population growth (1.02 % period 2000-2005) and water management, the water scarcity problem will be more critical in coming years (CAN, 2010).

Veracruz State is located in the Gulf of Mexico watershed and is divided into three regions: north, central and south. The northern region has an average precipitation of 1 552 mm, with an evaporation rate over 70 %. Following the FAO ranking for pressure on hydrologic resources, an indicator that considers the amount of water available and water used, climatic conditions and population size, this region generates a medium pressure on water availability, from 10 to 20 % (Fundación Gonzalo Río Arronte and Fundación Javier Barros Sierra, 2004; CAN, 2008).

To face water scarcity is not an easy task because the problem originates not only in the lack of protection of hydrological ecosystem services, but also with water extraction, transport, storage, use and pollution (World Bank, 2004; CNA, 2006; UNESCO, 2006).

In this context, the payment for hydrological ecosystem services (PHES) program (FAO, 2004b) is an action suggested to protect the areas that produce water. In Mexico this strategy was designed to give economic incentives to the owners of forest lands to support conservation practices and avoid soil use changes (Conafor, 2009). In general, PHES improves natural

propuesta para proteger las áreas que generan el agua. En México dicha estrategia se diseñó para brindar incentivos económicos a los dueños de terrenos forestales para apoyar las prácticas de conservación y evitar cambios de uso de suelo (Conafor, 2009). En general, PSAH mejora la conservación de los bosques naturales (Pagiola *et al.*, 2006); sin embargo, se basa en suposiciones hidrológicas "Causa-Efecto" y crea una situación que podría originar falsas expectativas y conflictos sociales (Landell-Mills y Porrás, 2002; Kaimowitz, 2005; FAO, 2004b).

Aun cuando la información biofísica es necesaria para apoyar esquemas de PSAH (FAO, 2004a), son pocos los casos en que es intrínseca a la toma de decisiones (UNESCO, 2006). En consecuencia, la obtención de datos específicos del sitio se recomienda como un primer paso en la construcción de PSAH y de políticas locales (FAO, 2004b).

Al respecto, el objetivo del estudio que se describe a continuación fue determinar el comportamiento hidrológico de bosques naturales y pastizales localizados en el área de captura de las partes altas de las montañas de Otontepec, en el norte del estado de Veracruz.

## Materiales y Métodos

### Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el municipio Tepetzintla, en una cuenca ubicada en la Sierra de Otontepec, sobre una montaña volcánica aislada, entre 97°58'30" y 97°48'00" oeste y 21°19'19" y 21°09'34" norte (SDSMA, 2007).

El clima es A ( $w_2$ ) tropical subhúmedo (clasificación de Köppen), con una estación seca de marzo a junio y una lluviosa de julio a febrero. La precipitación media en la zona es de alrededor de 1 552 mm año<sup>-1</sup> (CNA, 2008).

La altitud tiene un intervalo de 350 hasta 900 m. La geología está representada por rocas ígneas, basálticas, volcánicas y sedimentarias, todas ellas desde el período Mioceno (Inegi, 2010; SGM, 2004). La topografía es intrincada y reúne estructuras de cantos afilados, barrancos y procesos coluviales. Estudios previos sobre la génesis de la Sierra de Otontepec indican que la montaña se formó por procesos volcánicos (Robin, 1976). Su base, al igual que todo el valle costero, está a 220 msnm, y resultó del aumento de la placa tectónica continental en el período Oligoceno (35-23 millones de años). Los suelos son Inceptisoles y Alfisoles (FAO, 1990).

La vegetación natural es el bosque tropical semideciduo, representado por *Quercus oleoides* Cham. & Schlecht. en las zonas altas (SGM, 2004). Con base en la gran cantidad de información disponible, se seleccionó una cuenca de 68 ha en las tierras altas de la Sierra de Otontepec.

forest conservation (Pagiola *et al.*, 2006). However, these schemes are based on hydrologic "Cause-Effect" suppositions, creating a situation that could generate false expectations and social conflicts (Landell-Mills and Porrás, 2002; Kaimowitz, 2004; FAO, 2004b).

Whilst it is acknowledged that biophysical information is necessary to support PHES schemes (FAO, 2004), there are few instances where hydrological information is intrinsic to the decision-making (UNESCO, 2006). Consequently, the generation of site specific information is strongly recommended as a first step in the construction of local PHES and policies (FAO, 2004b).

In this context, the objective of the study here described was to determine the hydrological behaviour of natural forests and grasslands located in the catchment area of the highlands of Otontepec mountains at the north of Veracruz State.

## Materials and Methods

### Study area

The study was conducted in the Tepetzintla Municipality, in a basin located in an isolated volcanic mountain of Sierra de Otontepec. This mountain is located between 97°58'30" and 97°48'00" West, and 21°19'19" and 21°09'34" North (SDSMA, 2007).

The climate is A( $w_2$ ) sub-humid tropical (Köppen classification) with a dry season from March to June and a wet season from July to February. The average precipitation in the zone is around 1 552 mm year<sup>-1</sup> (CAN, 2008).

The altitudinal interval de 350 hasta 900 m. Geology is made up by igneous, basaltic, volcanic and sedimentary rocks, all of them from the Miocene (INEGI, 2010; SGM, 2004). Topography is intricate and it gathers sharp edge structures, cliffs and colluvial processes. Previous studies about the genesis of Sierra de Otontepec show that the mountain was formed by volcanic processes (Robin, 1976). The base of the mountain, as well as all the coast valley, is at 220 masl, and was the results of the increment of the continental tectonic plaque in the Oligocene (35 to 23 million years). Soils are inceptisols and alfisols (FAO, 1990).

Natural vegetation consists of a semi-deciduous tropical forest, with *Quercus oleoides* Cham & Schlecht. in the upland areas (SGM, 2004). A 68 hectares (ha) catchment in the Sierra de Otontepec highlands was selected for the study from the great amount of available information.

The catchment was divided in two subzones, the highlands and the lowlands. In the first ones, the selected land use forms

La cuenca se divide en dos subzonas: las tierras altas y las tierras bajas. En las primeras, los usos de la tierra elegidos fueron los bosques de regeneración secundaria (SRF); pastizales de estrella africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst var. *nlemfuensis*) sin árboles (GWT); y los pastizales estrella africana (*C. nlemfuensis*) con arbustos de *Conostegia xalapensis* (Bonpl.) D. Don ex DC (GS). En las tierras bajas, los usos de la tierra correspondieron a bosques perturbados de *Quercus oleoides* (QF) y pastizales de *Paspalum notatum* Flüggé sin árboles (NG). Las características de uso del suelo se determinaron con la metodología utilizada por Chacón *et al.* (2007).

Los SRF se localizan a 848 msnm con una pendiente de 40 % y una topografía compleja. Los propietarios de bosques indicaron que la vegetación primaria fue cortada y quemada en 1980, por una política gubernamental que promovía la conversión del bosque a la agricultura. El maíz fue cultivado durante dos años y después la tierra fue abandonada a la regeneración natural.

En el bosque se identifican tres estratos: árboles, arbustos y malezas, y el suelo está cubierto por una gruesa capa de hojarasca. El número de árboles por hectárea fue de 546 con un área basal de 745 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, la altura media del arbolado fue de 8.3 m, y el área total del dosel ocupado 12 212 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>. Las especies más comunes fueron *Heliocarpus donnell-smithii* Rose ex Donn. Sm. (19 %); *Persea* spp. (16.2 %); *Muntingia calabura* L. (13.4 %); *Inga spuria* Humb. et Bonpl. ex Willd. (12.7 %) y *Croton draco* Schltld. & Cham. (9.9 %). El número de arbustos por hectárea fue 2 133; las especies más comunes son *Turpinia insignis* (HBK) Tul. (23.9 %) y *C. xalapensis* (9.9 %).

El GWT se ubica a 825 msnm con una pendiente de 29 % y una topografía compleja. Los ganaderos revelaron que los pastizales tienen más de 30 años, a partir del momento en el que el bosque fue cortado, quemado y que se dispersaron semillas de pasto de Guinea (*Panicum maximum* Jacq.) para establecer pastizales. Sin embargo, este fue remplazado dentro de un lapso de 15 años por *C. nlemfuensis*. Los índices de agostadero fueron de 0.90 de Unidad Animal (UA) ha<sup>-1</sup> y tuvieron un sistema de manejo de rotación de pastoreo lento (30 días de pastoreo, 60 días de liberación).

El GS está en los 815 msnm con una pendiente de 55 % y topografía compleja. Los arbustos de *C. xalapensis* son comunes en las áreas forestales perturbadas, con troncos bien desarrollados, copas densas y no fueron pastoreados. El número de arbustos por hectárea en el sistema silvopastoral (SPS) fue de 516, y su área de dosel ocupó 3 637 m<sup>2</sup> (36.3 %). El control de arbustos se practica de forma manual sin el uso de agroquímicos. Las cargas fueron de 0.45 UA ha<sup>-1</sup>, con el manejo del pastoreo rotacional lento.

were the secondary regeneration forests (SRF), African Star grasslands (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst var. *nlemfuensis*) without trees (GWT), and African Star grasslands (*C. nlemfuensis*) with shrubs of *Conostegia xalapensis* (Bonpl.) D. Don ex DC (GS). In the lowlands, the land use that were selected were disturbed *Quercus oleoides* forests (QF) and *Paspalum notatum* Flüggé grasslands without trees (NG). Land use characteristics were determined following the methodology used by Chacón *et al.* (2007).

SRF was located at 848 masl with a slope of 40 % and a complex topography. Forest owners indicated that the primary forest was cut and burned in 1980, as a Government policy promoted forest conversion to agriculture. Maize was cultivated for two years, after which, the land was abandoned to regeneration.

Three strata can be identified in the forest: trees, shrubs and weeds, and soil covered by a thick litter layer. The number of trees per hectare was 546 with a basal area of 745 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, the average tree height was 8.3 m, and the total canopy area occupied 12 212 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>. The more common species were *Heliocarpus donnell-smithii* Rose ex Donn. Sm. (19 %); *Persea* spp. (16.2 %), *Muntingia calabura* L. (13.4 %); *Inga spuria* Humb. et Bonpl. ex Willd. (12.7 %) and *Croton draco* Schltld. & Cham. (9.9 %) et. The number of shrubs per hectare was 2 133 being *Turpinia insignis* (HBK) Tul. (23.9 %) and *C. xalapensis* (9.9 %) the most common species.

GWT were located at 825 masl with a slope of 29 % and complex topography. Cattle farmers indicated that the grasslands are elder than 30 years, dating from the time when the forest was cut and burned and Guinea grass seeds (*Panicum maximum* Jacq.) were spread to establish pastures. However, this grass was replaced within the last 15 years by *C. nlemfuensis*. Stocking rates were 0.90 Animal Unit AU ha<sup>-1</sup>, and had a slow rotational grazing management system (30 days grazing, 60 days release).

GS was located at 815 masl with a slope of 55 % and complex topography. *C. xalapensis* shrubs were common in disturbed forest areas, had well developed trunks and dense canopy, and were not grazed by livestock. The number of shrubs per hectare in the Silvopastoral System (SPS) was 516, and their canopy area occupied 3 637 m<sup>2</sup> (36.3 %). Shrubs control was manual without agrochemical use. Stocking rates were 0.45 AU ha<sup>-1</sup>, with slow rotational grazing management.

QF was at 715 masl with a slope of 32 %, and a complex topography. Forest characteristics were: 131 trees per hectare, 15.1 m average height, 277 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> basal area, and only one canopy stratum. Interviews with forest owners indicated that this forest was over 50 years old. From the farmers' points of view, oak trees were a problem, because they are very difficult

El QF se localiza a los 715 msnm con una pendiente de 32 % y topografía compleja. Se caracteriza por reunir un promedio de 131 árboles por hectárea con altura promedio de 15.1 m, área basal de 277 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, y un solo estrato de dosel. Los propietarios de bosques señalaron que la edad de esta comunidad supera los 50 años y que los encinos representan un problema porque es difícil producirlos por abajo del dosel y su crecimiento es muy lento, pero su madera tiene una gran demanda en los mercados locales para postes de cercas, leña y escuadría. A partir de un corte adecuado o por los daños causados por el viento, se aprovecha la oportunidad para introducir los pastizales, y la regeneración secundaria se controla con agroquímicos.

Por último, NG se localiza a los 713 msnm con una pendiente de 36 % y topografía irregular. Los propietarios de pastizales mencionaron que esta hierba "aparece" cuando hay sobrepastoreo, y es muy difícil de erradicar. El pastizal estaba bajo pastoreo continuo por el ganado y los caballos. La carga animal se calculó en 1.5 UA ha<sup>-1</sup>.

### Diseño del estudio

A partir de la variabilidad de las fuentes en el área de recarga, como la geología, el grado de la pendiente, el uso del suelo, los procesos coluviales y el tipo del suelo, la cuenca se dividió en tierras altas y bajas; dentro de cada una de ellas, se seleccionaron varios usos del suelo, los cuales se consideraron en forma individual, como caso de estudio. Las tierras altas correspondieron a SRF (24 años), GWT (> 30 años) y GS (> 30 años). Las tierras bajas, a QF (> 50 años) y NG (> 15 años).

Las variables medidas fueron densidad aparente, lluvia, escurrimiento, infiltración, escorrentía superficial y cambios en la humedad del suelo. Las variables calculadas fueron evapotranspiración, intercepción del dosel y percolación. El balance hidrológico por uso del suelo se estimó mediante la siguiente fórmula, adaptada de Pilbeam *et al.* (1995):

$$R = ET + I + P + R^* + \Delta S \quad (1)$$

Donde:

- R = Precipitación (mm)
  - R\* = escorrentía (mm)
  - ET = Evapotranspiración (mm)
  - I = Intercepción por el dosel\* (mm)
  - P = percolación (mm)
  - ΔS = Cambio en el almacenamiento de agua en el perfil del suelo (mm)
- \*En la regeneración secundaria del bosque y del bosque de *Quercus oleoides*.

to produce beneath the canopy and they have a slow growth rate, but their wood has a high demand in local markets for fence poles, firewood and lumber. From the right cutting or wind damage, there was an opportunity to introduce grasslands and secondary regeneration is controlled with agrochemicals.

Finally, NG was located at 713 masl with a slope of 36 % and irregular topography. Grassland owners mentioned that this grass "appears" in this area when it is overgrazed, and it is very difficult to eradicate. This grassland was under continuous grazing by cattle and horses and the stocking rate was calculated as 1.5 AU ha<sup>-1</sup>.

### Experimental design

From the sources variability in the recharge area such as geology, slope grade, land use, colluvial processes and soil type, the basin was divided into two subsections, highlands and lowlands. In each area, several land uses were selected and each one was considered as a case study. Highlands land uses were SRF (24 years old), GWT (>30 years old) and GS (>30 years old). The land uses of the Lowlands were QF (>50 years old) and NG (>15 years old).

The measured variables were bulk density, rainfall, throughfall, infiltration rate, surface runoff, and changes in soil moisture. Calculated variables were evapotranspiration, canopy interception and percolation. The hydrological balance in each land use was estimated by the following formula, adapted from Pilbeam *et al.* (1995):

$$R = ET + I + P + R^* + \Delta S \quad (1)$$

Where:

- R = Precipitation (mm)
  - R\* = Runoff (mm)
  - ET = Evapotranspiration (mm)
  - I = Canopy interception\* (mm)
  - P = Percolation (mm)
  - ΔS = Change in water storage within the soil profile (mm)
- \* In secondary regeneration forest and *Quercus oleoides* forest.

### Precipitation and throughfall

Three rustic pluviometers made with recycled and rigid plastic container and one standard HOBO® Rain Gauge Data Logger - RG3 pluviometer were used, which were located near the selected land uses. In the case of QF and SRF, throughfall was measured near the runoff plots with eight horizontal pluviometers of 1 m long (Ford and Deans, 1978; Bruijnzeel, 1990; Pilbeam *et al.*, 1995; Wallace *et al.*, 1995; Ward and Elliot, 1995; Hafkenscheid, 2000).



## Precipitación y percolación

Se utilizaron tres pluviómetros rústicos hechos con envases reciclados de plástico rígido y un pluviómetro estándar (HOBO® *Rain Gauge Data Logger* - RG3), los cuales se colocaron en las inmediaciones de los usos de suelo seleccionados. En el caso de QF y SRF, el escurrimiento se midió cerca de las parcelas de escorrentía con ocho pluviómetros horizontales de 1 m de longitud (Ford y Deans, 1978; Bruijnzeel, 1990; Pilbeam *et al.*, 1995; Wallace *et al.*, 1995; Ward y Elliot, 1995; Hafkenscheid, 2000).

## Escurrimiento

Se estableció una parcela de escorrentía a la mitad de la pendiente de cada tipo de uso de suelo, cuyas dimensiones fueron de 10 x 20 m (pendiente abajo) (McDonald *et al.*, 2002). Para estabilizar el suelo después de la parcela de escorrentía, se instalaron parcelas con un año de antelación, entre mayo y julio de 2006; y de agosto de 2007 a julio de 2010 se registraron los escurrimientos.

Los pastizales sin árboles y los pastizales con arbustos fueron pastoreados durante todo el año en la misma proporción y al mismo tiempo de rotación que los agricultores utilizan, con el fin de conservar el sistema de manejo existente.

Las parcelas de escorrentía instaladas en este tipo de uso de suelo se siniestaban con frecuencia debido al ganado, pero se reparaban de inmediato. Con el fin de detener el efecto de la lluvia por dentro o por fuera de cada una de ellas, se les delimitó con láminas de zinc, que se clavaron en el suelo a 7.5 cm de profundidad y sobresalientes por encima del suelo a 7.5 cm de altura. Cada parcela se drenó hacia una esquina donde había tubería de desagüe de 10 cm de diámetro. El tubo de drenaje estaba conectado a una serie de tambores de plástico especialmente adaptados y calibrados; las zanjas que conectaban a los tambores estaban cubiertas, para evitar la entrada directa de lluvia (Acharya *et al.*, 2007; Acharya *et al.*, 2008).

El 25 de septiembre de 2006 se registró una tormenta con una precipitación de 200 mm en 24 horas; por ello se diseñó un sistema de recolección multi-ranura con tres tambores. El primero tenía una capacidad de 250 L y a través del mismo se pasaba una octava parte del líquido para el próximo tambor. La capacidad del segundo era 1 600 L y conducía un décimo de la escorrentía para el tercer tambor, cuya capacidad era de 20 000 L. El sistema se diseñó para registrar un máximo de 21 850 L o 110 mm de escurrimiento por tormenta (Acharya *et al.*, 2007; Acharya *et al.*, 2008).

## Runoff

One runoff plot was established in the middle of the slope of each land use type. Runoff plot size was 10 x 20 m (downslope) (from McDonald *et al.*, 2002). In order to stabilize the soil after runoff plot installation, plots were installed one year in advance (May-July 2006). Runoff was then recorded from August 2007 to July 2010.

The grasslands without trees and with shrubs were grazed all year round at the same stocking rate and at the same rotation time that the farmers use, with the aim of conserving the existing management system.

The runoff plots in this kind of land use were frequently damaged by livestock, but were repaired immediately. In order to stop the effect of rainfall inside and outside each one of them, they were delimited with zinc plates that were placed inside the ground at 7.5 cm deep and that protrude over the ground at 7.5 cm high. Each plot was drained to one corner where there was a 10 cm diameter drainpipe. The drainpipe was connected to a series of specially adapted and calibrated plastic drums; the trenches connecting drums were covered to prevent direct rainfall input (Acharya *et al.*, 2007; Acharya *et al.*, 2008).

On September 25<sup>th</sup>, 2006, a rainstorm was recorded to have precipitated 200 mm of rain in 24 hours. Taking this storm into account, the field equipment was designed with three drums and a multi-slot collection system. The first drum had a capacity of 250 L and passed one eighth of the runoff to the next drum. The second drum had a capacity of 1 600 L and passed one tenth of the runoff to the next drum. Finally, the third drum had a capacity of 20 000 L. This system was designed to record a maximum of 21 850 L or 110 mm of runoff per rainstorm event (Acharya *et al.*, 2007; Acharya *et al.*, 2008).

## Infiltration

Infiltration rates were measured by the double ring method (Anderson and Ingram, 1993; Ward and Elliot, 1995) in areas near the runoff plots when soil was at field capacity (wet season: July - December). Five sites were randomly selected and the infiltration rate was calculated in each land use with the Kostiakov equation:

$$I = at/b$$

Where:

$I$  = Accumulated infiltration

$t$  = Accumulated time

( $a$ ) y ( $b$ ) = Soil parameters (Henríquez y Cabalceta, 1999)

In GS, infiltration tests were developed under the shrub canopy and in open areas (four tests in each area).



## Infiltración

Las tasas de infiltración se midieron utilizando el método del anillo doble (Anderson e Ingram, 1993; Ward y Elliot, 1995) en las zonas vecinas a las parcelas de escorrentía, cuando el suelo estaba a capacidad de campo (temporada de lluvias: julio - diciembre). Fueron seleccionados al azar cinco sitios, y la tasa de infiltración se calculó en cada uso de la tierra con la ecuación Kostiakow:

$$I = at/b$$

Donde:

$I$  = Infiltración acumulada

$t$  = Tiempo acumulado

( $a$ ) y ( $b$ ) = Parámetros del suelo (Henríquez y Cabalceta, 1999)

La prueba de infiltración (GS), se desarrolló bajo el dosel de arbustos y en áreas abiertas (cuatro pruebas en cada área).

## Densidad aparente

El método de la bolsa abierta se utilizó para determinar la densidad aparente del suelo, debido al alto contenido y tamaño de las rocas y grava (USDA, 1999). Veinte muestras replicadas se tomaron en cada uso del suelo, excepto los pastizales y arbustos (GS) donde se obtuvieron 15 muestras cada una bajo el dosel y en áreas abiertas.

## Evapotranspiración y drenaje

Debido a la pedregosidad de los suelos, no fue posible colocar sensores verticales de humedad del suelo ECH2O - Decagon®. Por lo tanto, se excavaron calicatas y los sensores ECH2O - Decagon® se instalaron horizontalmente en un pequeño agujero en el muro del hoyo a tres profundidades: 15, 45 y 75 cm. Cada orificio se llenó cuidadosamente después del análisis. La humedad del suelo se midió cada 2 h y la información se almacenó en un record de datos ECH2O Decagon®. Los cambios en el perfil de humedad del suelo se calcularon cada 24 h. La evapotranspiración y la percolación se determinaron a partir de los cambios en el contenido de humedad del suelo con las siguientes ecuaciones (Klajj y Vachaud, 1992):

Estación seca (de marzo a junio)

$$ET = Som(t) - Som(t + Dt)$$

Temporada de lluvias (de julio a febrero)

$$ET = Pr - R - I + Som(t) - Som(t + \Delta t) - K(\theta_a) \Delta t$$

## Bulk density

The open bag method was used to determine soil bulk density due to the high content and size of rocks and gravel (USDA, 1999). Twenty replicate samples were taken in each land use, except grasslands and shrubs (GS) where 15 samples were collected under canopy and in open areas.

## Evapotranspiration and drainage

Due to the stoniness of the soils it was not possible to install vertical soil moisture sensors. Therefore, soil pits were excavated and the ECH<sub>2</sub>O - Decagon® sensors were installed horizontally in a small hole in the pit wall at three depths; 15, 45 and 75 cm. Each hole was carefully filled after the analysis. Soil moisture was measured every 2 hours and information was stored in a datalogger (ECH<sub>2</sub>O Decagon®). Changes in soil moisture profile were calculated every 24 hrs. Evapotranspiration and percolation were calculated from changes in soil moisture content with the following equations (Klajj and Vachaud, 1992):

Dry season (from March to June)

$$ET = Som(t) - Som(t + \Delta t)$$

Wet season (from July to February)

$$ET = Pr - R - I + Som(t) - Som(t + \Delta t) - K(\theta_a) \Delta t$$

Percolation

$$P = S_{rm}(t) - S_{rm}(t + \Delta t)$$

Where:

$ET$  = Evapotranspiration

$S_{om(t)}$  = Water stored in soil profile from surface  $o$  to the maximum root depth  $m$  in a  $\Delta t$  period

$Pr$  = Precipitation

$R$  = Runoff

$I$  = Canopy interception

$P$  = Percolation

$K(\theta_a) \Delta t$  = Unsaturated hydraulic conductivity

$S_{rm(t)}$  = Moisture stored in the layer from the maximum rooting depth  $m$  to the maximum depth of soil moisture measurements  $r$  in a  $\Delta t$  period

## Spring flow measurement

The land uses considered in this study were located at the base of the Recharge Area (RA); the presence of springs that provide water to the low lands was recognized. By constructing rustic infrastructure, the flow was measured from July, 2006 to Mayo,

Percolación

$$P = S_{rm}(t) - S_{rm}(t + \Delta t)$$

Donde:

- $ET$  = Evapotranspiración  
 $S_{om}(t)$  = Agua almacenada en el perfil del suelo desde la superficie o a la máxima  $m$  profundidad de la raíz en un lapso de tiempo  $\Delta t$   
 $Pr$  = Precipitación  
 $R$  = Escorrentía  
 $I$  = Intercepción del dosel  
 $P$  = Percolación  
 $K(\theta_s) \Delta t$  = Conductividad hidráulica no saturada  
 $S_{rm}(t)$  = Humedad almacenada en la capa de la profundidad máxima de enraizamiento  $m$  a la profundidad máxima de las mediciones de humedad del suelo  $r$  en un tiempo  $\Delta t$

### Medición de flujo de manantiales

En la base de la zona de recarga (RA) se ubicaron los usos del suelo en estudio; se reconoció la presencia de manantiales que abastecen a las comunidades de las tierras bajas. Mediante la construcción de infraestructura rústica se midió su flujo de julio de 2006 a mayo de 2010. El flujo se registró en  $L \text{ seg}^{-3}$  o  $m \text{ seg}^{-1}$ , y se calculó el flujo volumétrico medido por el tiempo que se tarda en liberar una cantidad precisa de agua (Villon, 2002) con la siguiente fórmula:

$$Q = V/t$$

Donde:

- $Q$  = Caudal de agua base ( $L \text{ seg}^{-1}$ )  
 $V$  = Volumen de agua (L)  
 $t$  = Tiempo (segundos)

### Análisis estadísticos

Los resultados de densidad y velocidad de infiltración a granel fueron analizados por una  $t$ -test y se utilizó el software *InfoStat* Versión 1 (InfoStat, 2004).

## Resultados y Discusión

### Características del suelo

La zona de trabajo de campo se localiza en las tierras altas de montaña a 700-850 msnm, y las descripciones de perfiles de suelos se hicieron de acuerdo a la metodología de FAO (1990). El resumen de las descripciones de los perfiles de suelo, densidad aparente y pruebas de infiltración de doble anillo se muestran en los cuadros 1a y 1b.

2010. Flow was recorded in  $L \text{ seg}^{-3}$  or  $m \text{ seg}^{-1}$  and volumetric flow was determined by the time it takes to release a particular amount of water (Villon, 2002) with the following formula:

$$Q = V/t$$

Where:

- $Q$  = Base water flow ( $L \text{ seg}^{-1}$ )  
 $V$  = Volume of water (L)  
 $t$  = Time (seconds)

### Statistical analyses

Bulk density and infiltration rate results were analyzed by a paired  $t$ -test using the software *InfoStat* Version 1 (InfoStat, 2004).

## Results and Discussion

### Soil description

The study area is found in the mountain highlands at 700-850 masl and soil profile descriptions were made according to the FAO (1990) methodology. The summary of the soil profile descriptions, bulk density and double ring infiltration tests are shown in Tables 1a and 1b.

It is worth-noting that the underground water recharge zone consists of extrusive alkaline-basaltic lava (Robin, 1976), and that during the cooling process of this material, deep creeks developed in the rock, a situation that favors erosion and porosity, and thus, water infiltration. Thus, it is probable that the rock bed of the subsoil in the study area is porous and permeable, which could limit soil saturation and generate a fast drainage (Smith, 2004; UNESCO, 2006). In fact, basalt aquifers tend to generate low runoff in rainfall events, either in low-intensity long-duration winter storms, or short-duration high-intensity summer thunderstorms (Stephenson and Zuzel, 1981). Additionally, underground runoff is common in volcanic soils with steep slopes and colluvial processes (Weiler *et al.*, 2005).

Bulk density results indicated that, soils under grasslands without trees showed statistical difference ( $p < 0.050$ ) in comparison with soils under forest or grasslands and shrubs; 1.18d, 1.17c, 0.97a, 0.99b, and 0.99b  $g \text{ cm}^{-3}$  for GWT, NG, SRF, QF and GS, respectively. These results show a similar tendency at the results mentioned by McGinty *et al.*, (1979), Weerts (1991), Yates *et al.* (2000) and Taddese *et al.* (2002).

Infiltration results indicated statistical difference ( $p < 0.050$ ) between grasslands without trees, and forest and grasslands and shrubs; 0.99c, 0.56c, 11.15a, 14.1a, 7.82b  $cm \text{ h}^{-1}$  by GWT, NG, SRF, GS, and QF, respectively (Table 2). This tendency is similar to data reported by Yates *et al.* (2000), Schultz *et al.* (2004) and Zimmermann *et al.* (2006). The large differences between SRF, GS, QF and GWT, NG were likely due to a



Cuadro 1a. Descripción del perfil del suelo, densidad aparente y tasa de infiltración en los tres usos de suelo localizados en la parte alta de la zona de recarga hídrica Sierra de Otontepec, Norte de Veracruz, 2008.

Table 1a. Description of the soil profile, bulk density and infiltration rate in the three land uses located in the highlands of the water recharge zone of Sierra de Otontepec, North of Veracruz, 2008.

	Uso de suelo		
	Bosque en regeneración secundaria	Pasturas sin árboles	Pasturas + Arbustos de C. xalapensis
Altitud msnm	848	805	779
Grado de pendiente en el sitio %	40 (compleja)	29 (compleja)	55 (compleja)
Cobertura Vegetal %	> 80 (hojas y mulch)	> 80 (pasturas)	> 80 (arbustos y pasturas)
Material Parental	Depósitos Coluviales de Lava Basáltica	Depósitos Coluviales de Lava Basáltica	Depósitos Coluviales de Lava Basáltica
Tipo de Suelo (USDA 1998)	Inceptisol	Inceptisol	Inceptisol
Evidencia de Erosión	Ninguna	Ninguna	Ninguna
Profundidad Suelo (cm)	> 100	> 100	> 90
Tipo de drenado	bien drenado	bien drenado	bien drenado
Características Horizonte A			
Profundidad (cm)	35	40	30
Color (Munsell)	7.5YR2.5/3	7.5YR4/4	5YR3/2
Textura	Arcilloso - Limoso	Arcilloso - Limoso	Franco-arcillo-arenosos
Arena %	37.84	39.84	47.84
Arcilla %	28.16	32.16	28.16
Limo %	34.00	28.00	24.00
pH	6.29	6.74	6.23
Materia orgánica %	3.8	5.09	5.56
Presencia de fragmentos de roca %	- 40	15 - 40	15 - 40
Estructura del suelo	Bloques Sub- angulares	Bloques Sub- angulares	Bloques Sub- angulares
Consistencia Húmeda	Muy friable	Friable	Muy Friable
Espacio Intersticial	Común	Común	Común
Abundancia de raíces	Común	Algunas	Común
Pruebas de Suelo			
Densidad Aparente (g cm <sup>-3</sup> )	0.97 <sup>a</sup>	1.18 <sup>d</sup>	0.99 <sup>b</sup>
Tasa de Infiltración (cm h <sup>-1</sup> )	11.15 <sup>a</sup>	0.99 <sup>c</sup>	14.1 <sup>e</sup>

Letras distintas indican diferencia estadística (p<0.050).

Different letters are equivalent to a statistical difference (p<0.050).



Cuadro 1b. Descripción del perfil del suelo, densidad aparente, tasa de infiltración en los tres usos de suelo localizados en la parte baja de la zona de recarga hídrica. Sierra de Otontepec, Norte de Veracruz, 2008.

Table 1b. Description of the soil profile, bulk density and infiltration rate in the three land uses located in the lowlands of the water recharge zone of Sierra de Otontepec, North of Veracruz, 2008.

	Usos de suelo	
	Bosque Perturbado de <i>Quercus oleoides</i>	Pastizal de <i>Paspalum</i> spp sin árboles
Altitud msnm	715	713
Grado de pendiente en el sitio %	32 compleja	36 lineal
Cobertura vegetal %	> 80	> 90
Material parental	Depósitos Coluviales, Lava basáltica	Depósitos Coluviales, Lava basáltica
Tipo de suelo (USDA 1998)	Inceptisol	Alfisol
Evidencia de erosión	Ninguna	Ninguna
Profundidad del suelo (cm)	> 95	> 95
Tipo Drenaje	Bien drenado	Bien drenado
Características del Horizonte A		
Profundidad (cm)	30	30
Color (Munsell)	7.5YR2.5/2	7.5 YR3/3
Textura	Franco-arcillo-arenosos	Franco-arcillo-arenosos
Arena %	47.84	45.84
Arcilla %	26.16	32.16
Limo %	26.0	22.0
pH	6.74	6.49
Materia orgánica %	4.21	4.55
Presencia de fragmentos de roca %	40 - 80	2 - 5
Estructura del suelo	Bloques granulares y sub angulares	Bloques granulares y sub angulares
Consistencia Húmeda	Friable	Friable
Espacio Intersticial	Común	Común
Abundancia de raíces	Común	Común
Pruebas de suelo		
Densidad aparente (g cm <sup>-3</sup> )	0.99 <sup>b</sup>	1.17 <sup>c</sup>
Tasa de Infiltración (cm h <sup>-1</sup> )	7.82 <sup>b</sup>	0.56 <sup>c</sup>

Letras distintas indican diferencia estadística (p<0.050).

Different letters are equivalent to a statistical difference (p<0.050).

Es importante destacar que la zona de recarga del agua subterránea es de lava basáltica alcalina extrusiva (Robin, 1976), y que, durante el proceso de enfriamiento de este material, las fisuras profundas se desarrollan en la roca, situación que favorece su erosión y la porosidad y, por lo tanto, la infiltración del agua. Es probable, entonces, que el lecho de roca del subsuelo en el área de trabajo de campo sea porosa y permeable, lo que podría impedir la saturación del suelo y generar un

higher percentage of rocks throughout the soil profile (Farvolden, 1963), and the presence of deep roots from trees and shrubs (Bergkamp, 1998).



rápido drenaje (Smith, 2004; UNESCO, 2006). De hecho, los acuíferos de basalto tienden a generar baja escorrentía en eventos de precipitación, ya sea en las tormentas de invierno de larga duración de baja intensidad, o las tormentas de verano de alta intensidad y corta duración (Stephenson y Zuzel, 1981). Además, el escurrimiento subterráneo es común en suelos volcánicos con pendientes pronunciadas y procesos coluviales (Weiler *et al.*, 2005).

Los resultados de la densidad aparente indican que los suelos bajo pastizales sin árboles mostraron diferencia estadística ( $p < 0.050$ ) en comparación con los suelos bajo bosques o pastizales y arbustos (1.18d, 1.17c, 0.97a, 0.99b y 0.99b  $g\ cm^{-3}$  para GWT, NG, SRF, QF y GS, respectivamente), mismos que siguen una tendencia similar a los obtenidos por McGinty *et al.* (1979), Weerts (1991), Yates *et al.* (2000) y Taddese *et al.* (2002).

Los datos de infiltración indican diferencia estadística ( $p < 0.050$ ) entre los pastizales sin árboles y los bosques con pastizales y arbustos (0.99c, 0.56c, 11.15a, 14.1a, 7.82b  $cm\ h^{-1}$  para GWT, NG, SRF, GS, y QF, respectivamente) (Cuadro 2). Dicho comportamiento se acerca a los datos de Yates *et al.* (2000), Schultz *et al.* (2004) y Zimmermann *et al.* (2006). Las grandes diferencias entre SRF, GS, QF y GWT, NG responden, probablemente, a un mayor porcentaje de rocas a lo largo del perfil del suelo (Farvolden, 1963), y la presencia de raíces profundas de los árboles y los arbustos (Bergkamp, 1998).

Cuadro 2. Capacidad de infiltración ( $cm\ h^{-1}$ ) a dos profundidades (0-5 cm y 45-50 cm) en una zona de recarga localizada en la Sierra de Otontepec, al norte del estado de Veracruz, México.

Table 2. Infiltration capacity ( $cm\ h^{-1}$ ) at two depths (0-5 cm and 45-50 cm) in a recharge zone area located in the Sierra Otontepec, Northern Veracruz state, Mexico.

Uso del suelo	Capacidad de infiltración ( $cm\ h^{-1}$ )	
	0-5 cm	45-50 cm
Bosque de regeneración secundaria	5.99	2.64
Bosque de <i>Quercus</i>	5.32	4.86
Pastizales con arbustos	1.25	0.29
Pastizales nativos	2.33	0.29
Pastizales de <i>Cynodon nlemfuensis</i>	1.21	0.09

Fuente: Sandoval (2010).  
Source: Sandoval (2010).

### Precipitación

La lluvia se registró a partir de junio de 2006 hasta julio de 2010. La precipitación anual total se calculó desde junio y hasta mayo del siguiente año, con el objetivo de seguir el ciclo natural de la lluvia. Los registros fueron: 1 617 mm en 2006-2007, 1 989 mm de 2007 a 2008, 1 641 mm de 2008 a 2009 y 1 458 de 2009-2010 y su distribución se muestra a continuación (Figura 1).

### Precipitation

Rainfall was recorded from June 2006 until July 2010. Total annual rainfall was calculated from June to May of the next year, with the aim to follow the natural rainfall cycle. Rainfall records were: 1 617 mm in 2006-2007; 1 989 mm in 2007-2008; 1 641 mm in 2008-2009 and 1 458 in 2009-2010 and their distribution every month are shown in Figure 1.

Historically (1971 - 2000) the mean rainfall in the study zone was 1 675 mm (CAN, 2008). However, in 2007 the impact of hurricanes "Dean" (date: 22/08/2007, Saffir/Simpson rank: 2, total rain: 301 mm in 25 hours, and maximum rain rate: 450  $mm\ h^{-1}$ ) and "Lorenzo" (date: 27/09/2007, Saffir/Simpson rank: 1, total rain: 182 mm in 26 hours, and maximum rain rate: 180  $mm\ h^{-1}$ ) and tropical storms Number 28 (date: 02/09/2007, total rain: 69 mm in 22 hours, and maximum rain rate 140  $mm\ h^{-1}$ ) and Number 29 (date 03/09/2007, total rain: 102 mm in 14 hours, and maximum rain rate 120  $mm\ h^{-1}$ ) generated an irregular rainfall season with high precipitation in August and September 2007.



### Soil moisture

Total annual soil moisture changes were calculated from August 2007 to July 2010. The different land uses exhibited similar soil moisture performance. For example, soil moisture at 15 cm depth had greater variability than at 45 and 75 cm, possibly due to the uptake and evaporation behavior caused by roots. The most stable soil moisture was observed at 75 cm deep, which

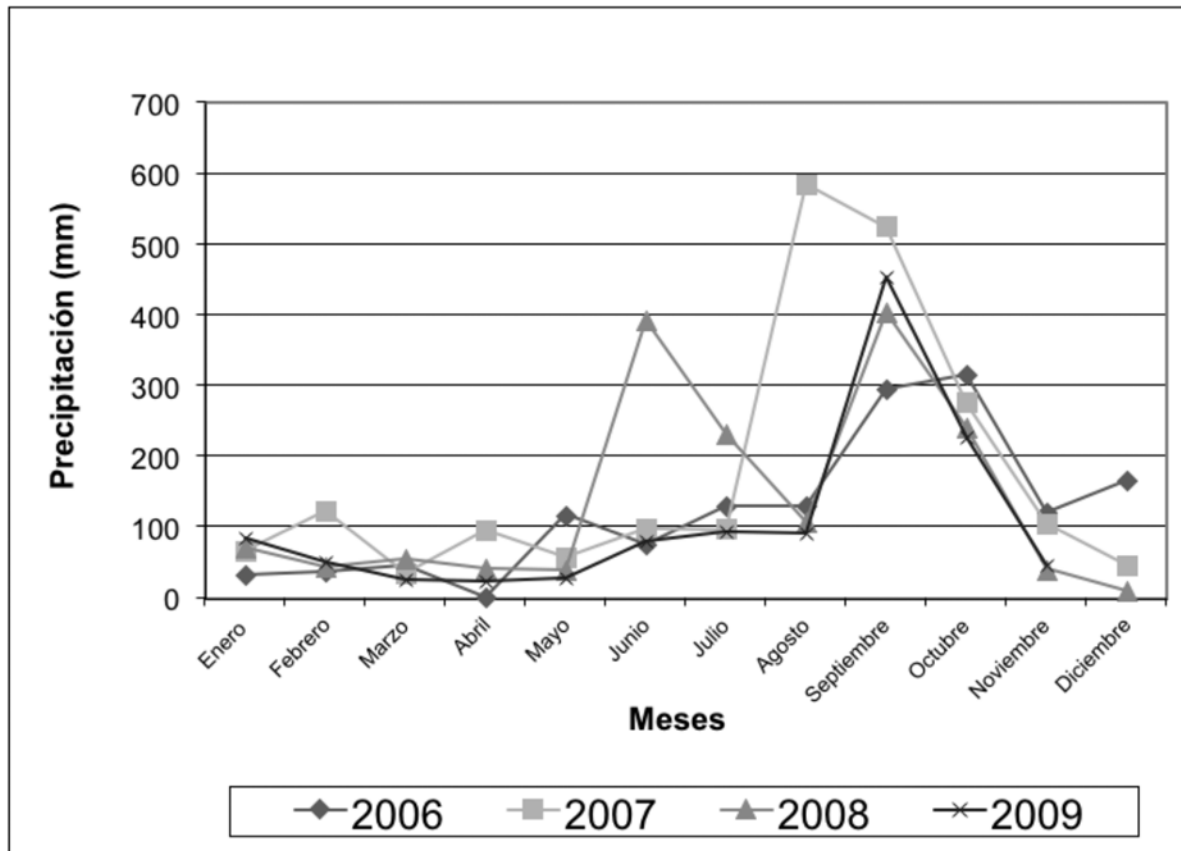


Figura 1. Distribución de la lluvia durante el periodo 2006-2010 en una zona de recarga de La Sierra de Otontepec, norte de Veracruz, México.

Figure 1. Rainfall distribution during four periods (since 2006 to 2010) in a recharge area located in the Sierra Otontepec, Northern of Veracruz, Mexico.

Históricamente (1971 - 2000) la precipitación media en la zona de estudio es del 675 mm (CNA, 2008). Sin embargo, en 2007 el impacto de los huracanes *Dean* (22 de agosto de 2007, de *Saffir / Simpson* clase 2, lluvia total de: 301 mm en 25 h, y tasa máxima de lluvia: 450 mm h<sup>-1</sup>) y "*Lorenzo*" (27 de septiembre de 2007, de *Saffir / Simpson* clase 1, lluvia total: 182 mm en 26 h y tasa máxima de lluvia: 180 mm h<sup>-1</sup>) y las tormentas tropicales Número 28 (9 de febrero de 2007), lluvia total: 69 mm en 22 h, y máxima velocidad: 140 mm h<sup>-1</sup>) y Número 29 (3 de septiembre de 2007), lluvia total: 102 mm en 14 h, y máxima intensidad de lluvia: 120 mm h<sup>-1</sup>) generaron una precipitación irregular, pues la temporada se caracterizó por altas precipitaciones en agosto y septiembre de 2007.

### Humedad del suelo

Las modificaciones anuales de humedad del suelo fueron calculadas de agosto a julio de 2007 a 2010. Los diferentes usos del suelo exhiben un rendimiento similar de este parámetro. Por ejemplo, a los 15 cm de profundidad hubo mayor variabilidad que la registrada a los 45 y 75 cm, posiblemente debido al

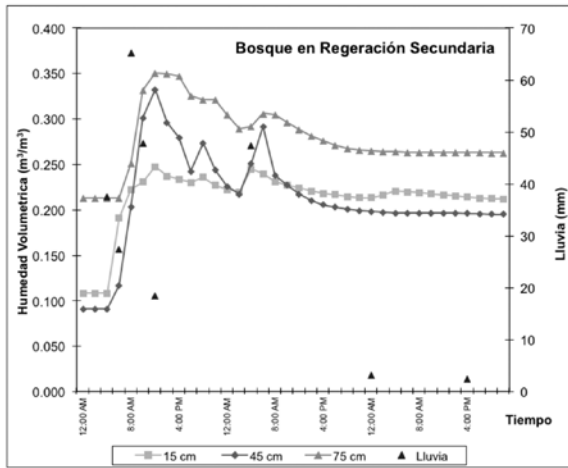
might be explained by the fact that plant roots seldom reached this depth.

Additionally, in all the cases and at all depths excess soil moisture drained over a short-time (24 hours), even after high intensity storms. This means that soils under study showed an extraordinary capacity to transport water through the soil profile, regardless of the land use. Figure 2 shows the soil moisture behavior during the strongest meteorological event recorded during the study time (Hurricane "Dean" Saffir/Simpson rank 2).

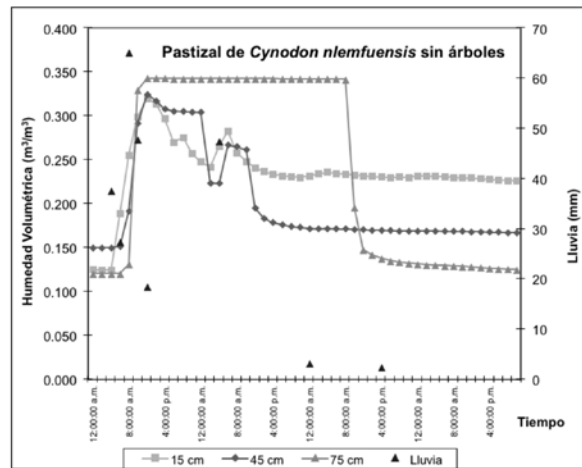
### Hidrological balance

The information recorded and calculated was used to calculate the hydrological balances of each land use during three periods (August 2007 - July 2008, August 2008 - July 2009, and August 2009 - July 2010) (Table 3a-e).

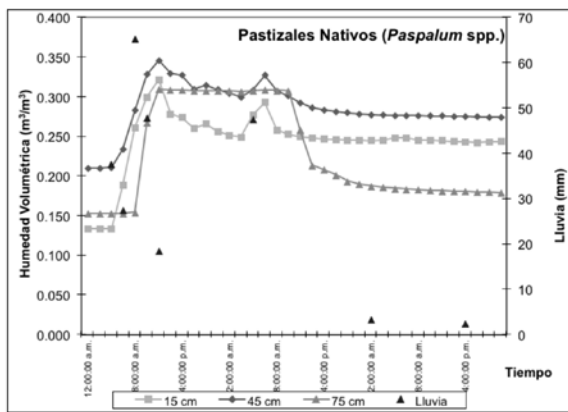
The hydrological balances indicate that runoff was scarce in all land uses, 26, 12, 63, 17, and 18 mm for SRF, GS, GWT, NG, and QF, respectively. This tendency is similar to the findings



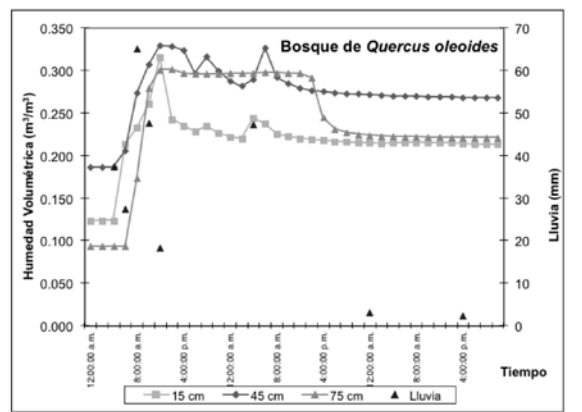
a)



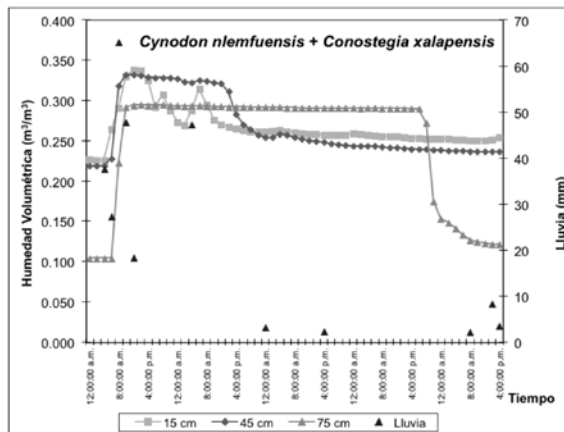
b)



c)



d)



e)

Figura 2. Comportamiento de la humedad del suelo en cinco usos del suelo localizados en una zona de recarga durante el impacto del durante el huracán Dean (22 de agosto 2007).

Figure 2. Soil moisture behavior in five land uses located in a recharge zone during the impact of the Hurricane Dean (August 22<sup>th</sup>, 2007).

comportamiento de absorción y evaporación causado por las raíces. El valor más estable se observó a los 75 cm, lo que pudiera responder a que rara vez dichas estructuras llegaban tan abajo.

reported in Oaxaca, Mexico, by Martínez and López (2001), and in the Blue Mountains of Jamaica by McDonald *et al.* (2002). This is probably due to the interaction among soil cover, vegetation roots, microtopography, soil characteristics and the

Además, en todos los casos y en todas las profundidades, el exceso de humedad drena durante un tiempo corto (24 h), incluso después de tormentas intensas. Esto significa que los suelos estudiados mostraron una extraordinaria capacidad para el transporte de agua a través del perfil del suelo, independientemente del uso de la tierra. La Figura 2 muestra el comportamiento de la humedad del suelo durante el fenómeno meteorológico más fuerte registrado en el tiempo de estudio (el huracán *Dean*, clase de *Saffir/Simpson 2*).

## Balances hídricos

La información registrada y calculada se utilizó para estimar los balances hídricos de cada uso del suelo para tres períodos (agosto 2007 a julio 2008, agosto 2008 a julio 2009 y agosto 2009 a julio 2010) (Cuadro 3).

presence of soil macropores (Bergkamp, 1998; Scherrer and Naef, 2003; Weiler and Naef, 2003). Total evapotranspiration calculated during these three years was higher in QF, SRF and NG, than in GS and GWT, 1 716, 1 384, 1 723, 1 166 and 1 283 mm, respectively. These results are similar to the information reported by Carbon *et al.* (1982), Hodnett *et al.* (1995), Jipp *et al.* (1998), Waterloo *et al.* (1999), Calder (2007) and Calder *et al.* (2007).

Finally, balances showed that forests and Native Grasslands percolated less water than introduced grasslands, 1 707, 2 486, 2 401, 3 270, and 3 518 mm by QF, SRF, NG, GWT and GS, respectively. These results are in agreement with Bosch and Hewlett (1982), Carbon *et al.* (1982), Bruijnzeel (1990), Waterloo *et al.* (1999), Kaimowitz (2005), Van der Salm *et al.* (2006) and Calder *et al.* (2007).

Cuadro 3. Balance hídrico en cinco tipos de uso de suelo durante tres periodos\* en la Sierra de Otontepec, norte de Veracruz, México.  
Table 3. Hydrological balance in five land uses during three periods\* in Sierra de Otontepec, Northern Veracruz, Mexico.

Parámetro	Periodo*			Total (Tres años)
	2007-2008	2008-2009*	2009-2010**	
a) Bosque con Regeneración Secundaria (SRF) a) Secondary Regeneration Forest (SRF)				
Intercepción del dosel (mm)	403	106	132	641
Lluvia neta (mm)	2 019	1 087	2 117	5 223
Escorrentía (mm)	21	0	5	26
ET (mm)	448	505	431	1 384
Cambios en la humedad del suelo (mm)	431	392	504	1 327
Percolación (mm)	1 119	190	1 177	2 486
b) Pastizales con arbustos (GS) b) Grasslands with shrubs (GS)				
Parámetro	Periodo*			Total (Tres años)
	2007-2008	2008-2009*	2009-2010**	
Intercepción del dosel (mm)	N/D	N/D	N/D	N/D
Lluvia neta (mm)	2 417	1 193	2 229	5 839
Escorrentía (mm)	9	0	3	12
ET (mm)	342	406	418	1 166
Cambios en la humedad del suelo (mm)	320	351	472	1 143
Percolación (mm)	1 746	436	1 336	3 518

Continúa Cuadro 3..

Continuación Cuadro 3..

c) Pastizales sin árboles (GWT)

c) Grasslands without trees (GWT)

Parámetro	Periodo*			Total (Tres años)
	2007-2008	2008-2009*	2009-2010**	
Intercepción del dosel (mm)	N/D	N/D	N/D	N/D
Lluvia neta (mm)	2 416	1 193	2 229	5 838
Escorrentía (mm)	41	10	12	63
ET (mm)	400	445	438	1 283
Cambios en la humedad del suelo (mm)	368	365	489	1 222
Percolación (mm)	1 607	373.	1 290	3 270

d) Pastizales nativos (*Paspalum* spp.) (NG)

d) Native grasslands (*Paspalum* spp.) (NG)

Parámetro	Periodo*			Total (Tres años)
	2007-2008	2008-2009*	2009-2010**	
Intercepción del dosel (mm)	N/D	N/D	N/D	N/D
Lluvia neta (mm)	2 388	1 164	2 159	5 711
Escorrentía (mm)	7	0	10	17
ET (mm)	581	565	577	1 723
Cambios en la humedad del suelo (mm)	487	479	604	1 570
Percolación (mm)	1 313	120	968	2 401

e) Bosque perturbado de *Quercus oleoides* (QF)

e) Disturbed *Quercus oleoides* forest(QF)

Parámetro	Periodo*			Total (Tres años)
	2007-2008	2008-2009*	2009-2010**	
Intercepción del dosel (mm)	180	95	227	502
Lluvia neta (mm)	2 121	1 027	1 934	5 082
Escorrentía (mm)	6	0	12	18
ET (mm)	578	657	481	1 716
Cambios en la humedad del suelo (mm)	563	523	555	1 641
Percolación (mm)	974	-153	886	1 707

\*12 meses de agosto a julio; \* = año "Niño" (año seco); \*\* = año "Niña" (año lluvioso).

\* 2 months from August to July; \* = "Niño" year (dry year); \*\* = "Niña" year (wet year).



Los balances hidrológicos indican que el escurrimiento fue escaso en todos los usos de la tierra, 26, 12, 63, 17, y 18 mm para la SRF, GS, GWT, NG, y QF, respectivamente. Esta tendencia es similar a los resultados en Oaxaca, México de Martínez y López (2001), y en las Montañas Azules de Jamaica de McDonald et al. (2002). Esto se debe, probablemente, a la interacción entre la cobertura del suelo, las raíces de la vegetación, la microtopografía, las características del suelo y la presencia de macroporos en él (Bergkamp, 1998; Scherrer y Naef, 2003; Weiler y Naef, 2003). La evapotranspiración total expresada en los tres años fue mayor en QF, SRF y NG, de GS y GWT, i.e., 1 716, 1 384, 1 723, 1 166 y 1 283 mm, respectivamente. Estos datos son similares a lo registrado por Carbon et al. (1982); Hodnett et al. (1995), Jipp et al. (1998), Waterloo et al. (1999), Calder (2007) y Calder et al. (2007).

Por último, los datos de balance mostraron que los bosques y pastizales nativos se extienden en terrenos con menos agua que los pastizales introducidos (1 707, 2 486, 2 401, 3 270 y 3 518 mm por QF, SRF, NG, GWT y GS, respectivamente). Lo anterior coincide con las cifras consignadas por Bosch y Hewlett (1982), Carbon et al. (1982), Bruijnzeel (1990), Waterloo et al. (1999), Kaimowitz (2005), Van der Salm et al. (2006) y Calder et al. (2007).

### Medición de flujo de los manantiales

Los manantiales que abastecen a las comunidades se identificaron a 650 msnm. Sus caudales medios al final de la estación seca (mayo) fueron 4.52, 4.74, 4.05 y 4.8 L segundo<sup>-1</sup> en 2006-2007, 2007-2008, 2008-2009, 2009-2010. Cuando se dividieron estos flujos entre la población total (2 072 habitantes) cada ciudadano recibió entre 160 y 200 L hab<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> (Cuadro 4).

### Spring flow measurement

Springs that supply communities were identified at 650 masl. Their mean flows at the end of the dry season (May) were 4.52, 4.74, 4.05 and 4.8 L second<sup>-1</sup> in 2006-2007, 2007-2008, 2008-2009, 2009-2010 periods, respectively. When these flows were divided among the total population (2 072 inhabitants) each citizen received between 160 and 200 L day<sup>-1</sup> (Table 4).

However, this amount is lower than the 250 L inhabitants<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup> referred to by the *Ley del Agua en México* (Law of Water in México), to fulfill basic domestic requirements (CNA 2008). Figure 3 shows spring measurements during four periods (from June to May each one); for 2006-2007 1 617 mm were obtained; in 2007-2008, 1 989 mm; in 2008-2009, 1 641 mm and finally, in 2009-2010, 1 458 mm. In this graphic it is clear that spring flows at the end of the dry season (May) were similar in the four periods, even though the amount of rainfall (mm) recorded in these periods was different.

This information generates several questions about the amount of rain and percolation water to recharge the aquifer, for example; how much percolation is needed to fulfill the subsoil in the recharge area? If Secondary Regeneration forest recorded less percolation than grasslands, this amount impacts in the spring flow? Or is it enough to reload the aquifer? In addition, if the base flow in May is around 5 L per second it



Cuadro 4. Medición del flujo de manantiales al final de la estación seca (mayo) durante cuatro periodos (2006-2007, 2007-2008, 2008-2009 y 2009-2010) en la Sierra de Otontepec, norte de Veracruz, México.

Indicador	Periodo (de junio a mayo cada uno)			
	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010
Lluvia (mm)	1 617	1 989	1 641	1 458
Flujo de manantiales en mayo (L segundo <sup>-1</sup> )	4.52	4.74	4.05	4.82
Flujo de manantiales in 24 h (L)	390 528	409 536	349 920	416 448
Disponibilidad de agua/ habitante (2 072 habitantes en total) (L día <sup>-1</sup> )	188.5	197.65	168.9	200.1





Table 4. Springs flow measurement at the end of the dry season (May) during four periods (2006-2007, 2007-2008, 2008-2009 and 2009-2010) in Sierra de Otontepec, Northern Veracruz, Mexico.

Indicator	Period (from June to May each one)			
	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010
Rainfall (mm)	1 617	1 989	1 641	1 458
Spring flow in May (L second <sup>-1</sup> )	4.52	4.74	4.05	4.82
Spring flow in 24 hours (L)	390 528	409 536	349 920	416 448
Water availability/ inhabitant (2 072 inhabitants in total) (L day <sup>-1</sup> )	188.5	197.65	168.9	200.1

Sin embargo, esta cantidad es inferior a los 250 L hab<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> mencionado por la Ley del Agua en México, para cumplir con los requisitos básicos domésticos (CNA, 2008). La Figura 3 muestra mediciones de primavera durante cuatro períodos (de junio a mayo de cada uno), para 2006-2007 se obtuvo 1 617 mm, en 2007-2008 1 989 mm, en 2008-2009 1 641 mm y finalmente en 2009-2010 1 458 mm. En esta gráfica es claro que los flujos de manantiales al final de la estación seca (mayo) fueron similares en los cuatro períodos, pero la cantidad de lluvia (mm) registrada en estos lapsos fue diferente.

means that the total amount of water released in one year, taking in account only the base flow, is around 158 000 000.00 L. If the recharge area has 68 hectares, mathematically, 230 mm year<sup>-1</sup> by percolation are needed to support the base flow. The excess of percolated water is released by peak flows during the storms. In this case the geology of the aquifer regulates the amount of water released after the storms and maintains the base flow during the next months.

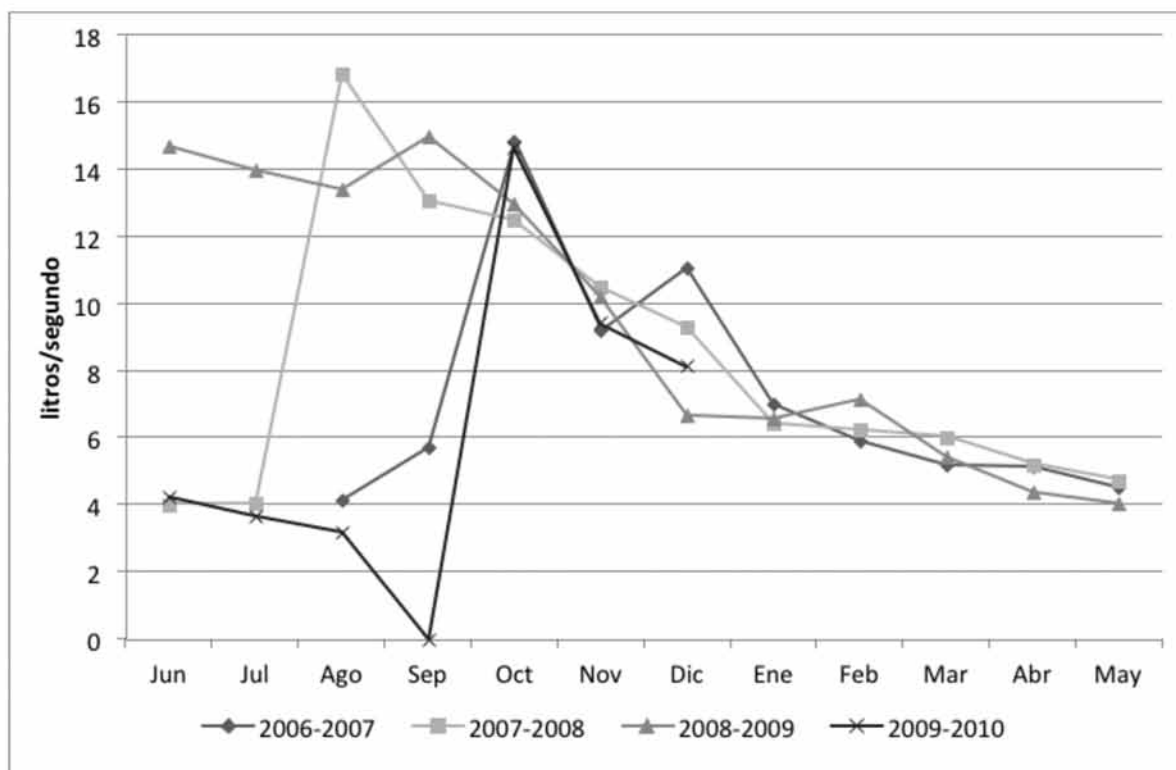


Figura 3. Flujo volumétrico del manantial durante cuatro periodos (de junio a mayo cada uno) en la Sierra de Otontepec, norte de Veracruz, México.

Figure 3. Hydrological balance measured during four periods (June to May) in Sierra de Otontepec, Northern Veracruz, Mexico.

Esta información da lugar a varias preguntas acerca de la cantidad de lluvia y la percolación del agua para recargar el acuífero; por ejemplo: ¿cuánta percolación se necesita para saturar con el subsuelo en la zona de recarga? Si los bosques de regeneración secundaria registran menos percolación que los pastizales, ¿esta cantidad impacta en el flujo de los manantiales? o ¿es suficiente para recargar el acuífero? Además, si el flujo de base del mes de mayo es de alrededor de  $5 \text{ L segundo}^{-1}$  significa que la cantidad total de agua liberada en un año, únicamente a partir del flujo de base, es de alrededor de  $158\,000\,000 \text{ L}$ . Si el área de recarga cuenta con  $68 \text{ hectáreas}$ , matemáticamente, se necesitan  $230 \text{ mm año}^{-1}$  por percolación para apoyar el flujo base. El exceso de agua filtrada es liberado por los flujos máximos durante las tormentas. En este caso, la geología del acuífero regula la cantidad de agua liberada después de las tormentas y mantiene el flujo base durante los próximos meses.

## Conclusiones

Los datos hidrológicos presentados conducen a información necesaria para la construcción de un esquema local del PSAH en la cuenca de captación en la que se realizó el estudio. No es factible proponer un aumento en el caudal de base del acuífero y cambiar pastizales por bosques, pues los usos de suelo ubicados en la zona de recarga del agua subterránea durante el período de trabajo generan servicios ambientales hidrológicos satisfactorios. Se propone que la conservación de los bosques debe ser apoyada, pero no como el ecosistema en el que se infiltra más agua, sino como el uso del suelo más cercano a mantener buenos y estables servicios hidrológicos en el largo plazo.

La gestión de los pastizales es más vulnerable a los cambios rápidos en respuesta a las modificaciones en la situación socioeconómica de los agricultores. Los resultados hidrológicos indican que el suministro de agua corriente a los usuarios del agua de las tierras bajas está en su máximo nivel. Esto implica que el aprovechamiento del vital líquido debe ser regulado y distribuido de manera más eficiente, en lugar de basarse en el aumento de la disponibilidad.

La aplicación de una política PSAH local es parte de un plan más complejo para enfrentar el problema de abastecimiento de agua informado por las comunidades. Esta estrategia debe tener en cuenta varias acciones como la protección de la zona de recarga de aguas subterráneas, la construcción de infraestructura hidráulica eficiente, la mejora de la organización local y el control del crecimiento demográfico. 🌿

## Conclusions

The hydrological data presented generates necessary information to be taken into account in the construction of a local scheme of PHES in the study basin. It is not feasible to propose an increment in the aquifer base flow by changing grasslands to forest, as the land uses located in the groundwater recharge zone during the period of study generate appropriate hydrological ecosystem services. It is suggested that forest conservation needs to be supported, but not as the ecosystem that percolates more water, but as the land use most likely to maintain good and stable hydrological services on the long run.

Grassland management is more vulnerable to rapid change in response to changes in the farmers' socioeconomic situations. Hydrological results indicate that the current water supply to lowland water users is at its maximum supply. This implies that water use needs to be regulated and distributed more efficiently, rather than relying on its increasing availability.

The application of a local PSEH policy is part of a more ambitious plan to face the water supply problem revealed by the populations. This strategy must take into account several actions such as the protection of the underground water recharge zone, the construction of an efficient hydraulic infrastructure, the improvement of the local organization and the demographic growth control. 🌿



## Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

## Contribución por autor

Jorge Luis Chagoya Fuentes: ejecución de la investigación, captura de datos y análisis estadístico; Carlos Mallén Rivera: conceptualización, estructuración, corrección y edición del manuscrito; Morag A. McDonald: formulación, planeación y desarrollo de la investigación; Francisco Jiménez Otarola: formulación, planeación y desarrollo de la investigación; Muhammad Akbar Ibrahim: análisis estadístico, ajuste de los modelos probados; Lourdes Velázquez-Fragoso: análisis de resultados, revisión del manuscrito e incorporación de correcciones; Francisco Becerra-Luna: revisión técnica del texto y análisis bibliográfico.

## Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Ph.D. Sampurno Bruijnzeel, al Ph.D. Andreas Nieuwenhuyse, al M. Sc. Ney Ríos y al cuerpo de apoyo de la Unidad de Ganadería y Manejo Ambiental del CATIE, Costa Rica, por su invaluable asesoría. A los miembros de la *School of the Environment and Natural Resources of Bangor University*, Reino Unido de la Gran Bretaña, por su orientación. Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), a la Fundación Produce de Veracruz y a la Comisión Nacional Forestal (Conafor) por su apoyo financiero, que fue fundamental. Al Ing. Jesús Zenil Méndez, Presidente Municipal de Tepetzintla, por su visión para enfrentar un problema político bajo un punto de vista científico. Y, finalmente, a los señores Alberto de la Cruz y Loreto de la Cruz por su ayuda en el trabajo de campo y en la captura de datos. El artículo se enmarca en el proyecto Valoración y optimización de los esquemas del pago de servicios ambientales en ecosistemas forestales de México (Fondos Fiscales INIFAP)

## Referencias

- Acharya, G. P., M. A. McDonald, B. P. Tripathi, R. M. Gardner and K. J. Mawdesley. 2007. Nutrient losses from rain-fed bench terraced cultivation systems in high rainfall areas of the mid-hills of Nepal. *Land Degradation and Development* 18: 486-499.
- Acharya, G. P., B. P. Tripathi, R. M. Gardner, K. J. Mawdesley and M. A. McDonald. 2008. Sustainability of sloping land cultivation systems in the mid-hills of Nepal. *Land Degradation and Development* 19: 530-541.
- Anderson, J. M. and J. S. I. Ingram (eds.). 1993. *Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods*. 2 ed. CAB International. Wallingford, Oxon, UK. 221 p.
- Bergkamp, G. 1998. A hierarchical view of the interactions of runoff and infiltration with vegetation and microtopography in semiarid shrublands. *Catena* 33: 201-220.
- Bosch, J. M. and J. D. Hewlett. 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 55: 3-23.
- Bruijnzeel, L. A. 1990. Hydrology of moist tropical forest and effects of conversion: a state of knowledge review. National Committee of The Netherlands for the International Hydrological Programme-UNESCO, International Institute of Aerospace Survey and Earth Sciences. Amsterdam, The Netherlands. 230 p.
- Calder, I. R. 2007. Forests and water -Ensuring forest benefits outweigh water costs. *Forest Ecology and Management* 251: 110-120.
- Calder, I., T. Hofer, S. Vermont and P. Warren. 2007. Towards a new understanding of forests and water. *Unasylva* 58(229): 3-10.
- Carbon, B. A., F. J. Roberts, P. Farrington and J. D. Beresford. 1982. Deep drainage and water use of forests and pastures grown on deep sands in a Mediterranean environment. *Journal of Hydrology* 55: 53-64.

## Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

## Contribution by author

Jorge Luis Chagoya Fuentes: research study, data organization and statistical analysis; Carlos Mallén Rivera: concept, structuring, correction and editing of the manuscript; Morag A. McDonald: organization, planning and development of the research study; Francisco Jiménez Otarola: organization, planning and development of the research study; Muhammad Akbar Ibrahim: statistical analysis and fitting of the proved models; Lourdes Velázquez-Fragoso: data analysis, review and correction of the manuscript; Francisco Becerra-Luna: technical review of the manuscript and bibliographical analysis.

## Acknowledgements

The authors would like to express their gratitude to Ph.D. Sampurno Bruijnzeel, Ph.D. Andreas Nieuwenhuyse, M. Sc. Ney Ríos and to the support team of the *Unidad de Ganadería y Manejo Ambiental* of CATIE, Costa Rica, for their great advice. To the members of the School of the Environment and Natural Resources of Bangor University, United Kingdom, for their guidance. To the *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias* (INIFAP), the *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología* (Conacyt), the *Fundación Produce de Veracruz* and the *Comisión Nacional Forestal* (Conafor) por their financial support which was basic. To Ing. Jesús Zenil Méndez, *Presidente Municipal of Tepetzintla*, for his ambition to face a political problem under a scientific viewpoint. And finally, to Alberto de la Cruz and Loreto de la Cruz for their kind help during field work and data capture.

*End of the English version*

- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2006. *La gestión del agua en México. Avances y retos*. México, D. F., México. 249 p.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2008. *Estadísticas de agua en México*. México, D. F., México. 233 p.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2010. *Estadísticas de agua en México*. México, D. F., México. 249 p. Completar
- Conafor 2009. *Servicios Ambientales del Bosque. Gerencia de Servicios Ambientales del Bosque, CONAFOR*. Disponible [www.conafor.gob.mx](http://www.conafor.gob.mx) (consultado el 22 febrero de 2012). Completar
- Chacón L., M., C. A. Harvey y D. Delgado. 2007. Diversidad arbórea y almacenamiento de carbono en un paisaje fragmentado del bosque húmedo de la zona atlántica de Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambiente* 51-52: 19-32.
- Farvolden, R. N. 1963. Geologic controls on ground-water storage and base flow. *Journal of Hydrology* 1: 219-249.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 1990. *Guidelines for soil profile description*. Rome, Italy, 30 p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2004a. *Electronic forum on payments schemes for environmental services in catchments. Final Report*. Santiago, Chile. 27 p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2004b. *Electronic forum on payments schemes for environmental services in catchments. Regional Forum*. Arequipa, Peru. 95 p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2007. *Forest and Water*. *Unasylva* 229(58): 1-73.
- Ford, E. D. and J. D. Deans. 1978. The effects of canopy structure on stemflow, throughfall and interception loss in a young Sitka Spruce plantation. *Journal of Applied Ecology* 15: 905-917.

- Fundación Gonzalo Río Arronte y Fundación Javier Barros Sierra. 2004. *Prospectiva de la demanda de agua en México, 2000 - 2030*. México, D. F., México. 105 p.
- Hafkenscheid, R. L. L. J. 2000. Hydrology and biogeochemistry of tropical montane rain forest of contrasting stature in the Blue Mountains, Jamaica. Ph. D. Thesis. Vrije Universiteit te Amsterdam. Amsterdam, The Netherlands. 302 p.
- Henríquez, C. y R. Cabalceta. 1999. *Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con enfoque agrícola*. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 122 p.
- Hodnett, M. G., L. Pimentel da Silva, H. R. da Rocha and R. Cruz Senna. 1995. Seasonal soil water storage changes beneath central Amazonian rainforest and pasture. *Journal of Hydrology* 170: 233-254.
- InfoStat. 2004. InfoStat Ver. 1. Turrialba, Costa Rica. s/p.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) 2010. *Compendio de Información geográfica 2010*. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/compendio.aspx>. (23 de septiembre de 2011).
- Jipp, P. H., D. C. Nepsta, D. K. Cassel and C. de Carvalho. 1998. Deep soil moisture storage and transpiration in forests and pastures of seasonally dry Amazonia. *Climatic Change* 39: 395-412.
- Kaimowitz, D. 2005. Useful myths and intractable truths: the politic of the link between forest and water in Central America. In: Bonell, M. and L. A. Bruijnzeel (eds.). *Forest, Water and People in the Humid Tropics: Past, Present and Future*. Hydrological Research for Integrated Land and Water Management. University Press. Cambridge, UK. pp. 86-98.
- Klajj, M. C. and G. Vachaud. 1992. Seasonal water balance of a sandy soil in Niger cropped with pearl millet, based on profile moisture measurements. *Agricultural Water Management* 21:313-330.
- Landell-Mills, N. and I. T. Porras. 2002. Silver bullet of fools' gold? A global review of markets for forest environmental services and their impact on the poor. *International Institute for Environment and Development. Instruments for Sustainable Private Sector Forestry Series*. London, UK. 272 p.
- Martínez, M. R. y L. C. López L. 2001. Caracterización geográfica y escalamiento de cuencas en zonas de ladera de Oaxaca. In: *Memoria del XI Congreso Nacional de Irrigación*. Guanajuato, Guanajuato, México. pp. 19-21.
- McDonald, M. A., J. R. Healey and P. A. Stevens. 2002. The effects of secondary forest clearance and subsequent land-use on erosion losses and soil properties in the Blue Mountains of Jamaica. *Agriculture Ecosystems and Environment* 92: 1-19.
- McGinty, W. A., F. E. Smeins and L. B. Merrill. 1979. Influence of soil, vegetation and grazing management on infiltration rate and sediment production of Edwards Plateau rangeland. *Journal of Range Management* 32:33-37.
- Meadows, D., J. Randers and D. Meadows. 2004. *Límites de crecimiento 30 años después- Galaxia, Gutemberg*. Barcelona, España. 338 p.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). 2011. *Estadísticas sanitarias 2011*. Ediciones OMS. París, Francia. pp. 105-108.
- Pagiola, S., J. Bishop y N. Landell-Mills. 2006. *La venta de servicios ambientales forestales*. 2ª edición. Instituto Nacional de Ecología-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D. F., México. 464 p.
- Pilbeam, C. J., C. C. Daamen and L. P. Simmonds. 1995. Analysis of water budgets in semi-arid lands from soil water records. *Experimental Agriculture* 31: 131-149.
- Robin, C. 1976. *El vulcanismo de las planicies de la Huasteca (Este de México)*. Datos Geoquímicos y Petrográficos. Universidad Nacional Autónoma de México. Boletín del Instituto de Geología. 96: 55-92.
- Rosegrant, M. W., X. Cai and S. A. Cline. 2002. *World water and food to 2025: dealing with scarcity*. International Food Policy Research Institute. Washington, DC, USA. 322 p.
- Sandoval G., C. 2010. *Comportamiento hidrológico y gestión del agua para consumo humano en la microcuenca San Juan Otontepec, Veracruz, México*. M. Sc. Tesis. CATIE. Cartago, Costa Rica. 160 p.
- Scherrer, S and F. Naef. 2003. A decision scheme to indicate domain hydrologic flow process on temperate grasslands. *Hydrological Processes* 17: 391-401.
- Schultz, R.C., T.M. Isenhardt, W.W. Simpkins, J.P. Colletti, 2004. *Riparian Forest Buffers in Agroecosystems - Structure, Function and Management - Lessons Learned from the Bear Creek Watershed Project in Central Iowa, USA*. Chapter 2 In: P.K.R. Nair, M.R. Rao, and L.E. Buck, (eds). *New Vistas in Agroforestry*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. p. 35-50.
- Secretaría de Desarrollo Social y Medio Ambiente, 2007. *Serie Protejamos nuestro medio ambiente*. Vol. Programa de Manejo de la Reserva de la Reserva Ecológica Sierra de Otontepec. Gobierno del Estado de Veracruz. Veracruz, Ver., México. pp. 10.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). 2004. *Paquetes Digitales Escala. Paquetes Digitales escala 1:250,000 Sierra de Otontepec, Municipio Tepetzintla*. [www.sgm.gob.mx](http://www.sgm.gob.mx) (mayo de 2012).
- Smith, R. P. 2004. Geologic setting of the Snake River Plain aquifer and Vadose Zone. *Vadose Zone Journal* 3: 47-58.
- Stephenson, G. R. and J. F. Zuzel. 1981. Ground water recharge characteristics in a semi-arid environment of Southwest Idaho. *Journal of Hydrology* 53: 213-227.
- Taddese, G., M. A. Mohamed Saleem, A. Abiyie and A. Wagnew. 2002. Impact of grazing on plant species richness, plant biomass, plant attribute, and soil physical and hydrological properties of Vertisol in East African Highlands. *Environmental Management* 29: 279-289.
- United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (UNESCO). 2006. *Water a shared responsibility: The United Nations World Water Development Report 2*. Paris, France. 601 p.
- United States Department of Agriculture (USDA). 1999. *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo*. [http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/stelprd1044786.pdf](http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprd1044786.pdf). (10 de junio de 2011)
- Van der Salm, C., H. Denier van der Gon, R. Wieggers, A. B. Bleeker and A. van den Toorn. 2006. The effect of afforestation on water recharge and nitrogen leaching in The Netherlands. *Forest Ecology and Management* 221: 170-182.
- Villón B., M. 2002. *Hidrología*. Instituto Tecnológico de Costa Rica - CRRH. Cartago, Costa Rica. 436 p.
- Wallace, J. S., N. A. Jackson and C. K. Ong. 1995. *Water balance of agroforestry systems on hillslopes*. Final report to the ODA Forestry Research Programme. Overseas Development Administration (ODA), Institute of Hydrology (IH), International Centre for Research in Agroforestry (ICRAF). Nairobi, Kenya. 39 p.
- Ward, A. D. and W. J. Elliot. 1995. *Environmental hydrology*. Lewis Publishers. Boca Raton, FL, USA. 462 p.
- Waterloo, M. J., L. A. Bruijnzeel, H. F. Vugts and T. T. Rawaga. 1999. Evaporation from *Pinus caribaea* plantations on former grasslands soils under maritime tropical conditions. *Water Resources Research* 35: 2133-2144.
- Weerts, G. J. 1991. Soil hydraulic conductivity on two tropical soil types under forest and a 25 year old pasture: field measurement and data application. *Atlantic Zone Programme*. CATIE- MAG- AUW. Turrialba, Costa Rica. Report Num. 4. 60 p.
- Weiler, M. and F. Naef. 2003. An experimental tracer study of the role of macropores in infiltration in grasslands soils. *Hydrological Processes* 17: 477-493.
- Weiler, M., J. J. McDonnell, I. T. Meerveld and T. Uchida. 2005. Subsurface storm flow. In: Anderson, M. G. and J. J. McDonnell (eds.). *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA. pp. 1-14.
- World Bank. 2004. *Water Resources Sector Strategy. Strategic directions for World Bank engagement*. Washington, DC, USA. 78 p.
- Yates, C. J., D. A. Norton and R. J. Hobbs. 2000. Grazing effects on plant cover, soil and microclimate in fragmented woodlands in South-Western Australia: implications for restoration. *Austral Ecology* 25: 36-47.
- Zimmermann, B., H. Elsenbeer and J. M. De Morales. 2006. The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: Implications for runoff generation. *Forest Ecology and Management* 222: 29-38.